



CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo
www.bassalo.com.br



Supercondutores II, Superfluidez II e o Prêmio Nobel de Física (PNF) de 2003.

O PNF de 2003 foi atribuído aos físicos, os russos Alexey A. Abrikosov (n.1928) e Vitaly Lazarevich Ginzburg (1916-2009) pelo desenvolvimento da teoria dos supercondutores II, e o anglo-norte-americano Anthony James Leggett (n.1938) pela explicação da superfluidez II. Em verbetes desta série, vimos que a *supercondutividade*, descoberta em 1911 pelo físico holandês Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926; PNF, 1913), indicava que, em certas temperaturas (denominadas críticas: T_C) próximas do zero absoluto, alguns materiais apresentavam resistência elétrica praticamente nula, como, por exemplo, o mercúrio (Hg): $T_C = 4,15$ K. Durante muitos anos, depois dessa descoberta, acreditou-se que, exceto pelo fato de apresentarem resistência quase nula, esses novos materiais, denominados posteriormente de *supercondutores I* (vide verbete nesta série), possuíam as mesmas propriedades que os condutores normais. Somente em 1933, os físicos alemães Fritz Walther Meissner (1882-1974) e Robert Ochsenfeld (1901-1993) mostraram que o estado *supercondutor* é diamagnético, ao observarem que as linhas de indução de um campo magnético externo eram expulsas do interior de um cilindro longo de estanho (Sn), quando este era resfriado abaixo de sua temperatura crítica T_C (temperatura em que ocorre a supercondutividade). Note-se que essa observação ficou conhecida desde então como *efeito Meissner-Ochsenfeld* (vide verbete nesta série). Ainda na década de 1930, duas teorias fenomenológicas foram desenvolvidas para explicar a *supercondutividade*: a termodinâmica, desenvolvida pelos físicos holandeses Cornelis Jacobus Gorter (1907-1980) e Hendrik Brugt Gerhard Casimir (1909-2000), em 1934; e a eletrodinâmica, elaborada pelos físicos alemães, os irmãos London, Fritz Wolfgang (1900-1954) e Heinz (1907-1970), em 1935.

As Teorias Fenomenológicas da Supercondutividade tratadas acima, indicavam que havia necessidade do desenvolvimento de uma *Teoria Microscópica da Supercondutividade*, uma vez que naquelas teorias ficava evidente que o fenômeno da supercondutividade se devia, de algum modo, à *interação elétron-fônon* (vide verbete nesta série). Desse modo, em 1957, os físicos norte-americanos John Bardeen (1908-1991; PNF, 1956; 1972), Leon Neil Cooper (n.1930; PNF, 1972) e John Robert Schrieffer (n.1931; PNF, 1972) desenvolveram a hoje célebre *Teoria BCS* (TBCS), segundo a qual o estado *supercondutor* deve-se, essencialmente, a uma condensação de elétrons em *pares de Cooper* de momento linear comum e sendo representada por uma função de onda coerente única. É interessante destacar como o *par de Cooper* tem elétrons com spins antiparalelos, então o seu spin total será nulo ($s = 0$) e seu comportamento é o de uma “molécula” de *onda s* ($\ell = 0$, sendo ℓ o momento angular orbital). Por sua vez, em 1958, o físico russo Nikolai Nikolaevich Bogoliubov (1900-1992) e, independentemente, o físico norte-americano Philip Warren Anderson (n.1923; PNF, 1977) apresentaram também uma *Teoria Microscópica da Supercondutividade*. No entanto, enquanto Bogoliubov usou o conceito de *quase-*

partícula, pois, para ele, a *supercondutividade* é descrita por uma mistura coerente de elétrons e dessas “partículas” (sobre essas “partículas” ou “buracos”, ver verbete nesta série), Anderson usou o conceito de *localização*: estado isolado quando um metal não-interagente é submetido a um grande potencial randômico. Este conceito ele havia desenvolvido, ainda em 1958, quando afirmou que um único elétron poderia ser *localizado* sem considerar a interação coulombiana. Vejamos, agora, a descoberta da supercondutividade II.

Em 1950 (*Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* 20, p. 1064), Ginzburg e o físico russo Lev Davidovich Landau (1908-1968; PNF, 1962) apresentaram uma descrição quanto-mecânica das teorias fenomenológicas da *supercondutividade I*, descrição essa que ficou conhecida como *Teoria de Landau-Ginzburg* (TL-G), na qual os efeitos cooperativos dos elétrons são descritos por um campo escalar (ψ) exponencial complexo, daí essa teoria ficar conhecida como *teoria- ψ da supercondutividade* (*ψ -theory of superconductivity*). Note que a grande ideia neste trabalho foi considerar, como uma espécie de função de onda schrödingeriana, o *parâmetro de ordem*, que havia sido definido por Landau, em 1937 (*Physikalische Zeitschrift der Sowjet Union* 11, p. 26; 129), ao descobrir uma *transição de fase de segunda ordem* na Física (a primeira ordem foi desenvolvida na Termodinâmica), na *supercondutividade* (de condutor para *supercondutor*), no magnetismo (de paramagnético para ferromagnético) e na *superfluidez* (de hélio líquido I para II: He I \rightarrow He II). Note que a TL-G prevê a existência de dois comprimentos característicos em um *supercondutor*. O primeiro (ξ), chamado de *comprimento coerente*, descreve o tamanho da flutuação termodinâmica na *fase supercondutora*; o segundo (λ), conhecido como *comprimento de penetração*, representa o comprimento de penetração do campo magnético na *fase supercondutora*. Esses comprimentos são caracterizados por $\kappa = \lambda/\xi$ - o *parâmetro de Ginzburg-Landau*. (en.wikipedia.org/wiki/Ginzburg-Landau_theory).

Em 1951, Abrikosov obteve o doutoramento no hoje *Instituto Pyotr Leonidovich Kapitza*, na Rússia, tendo como orientador Landau, sendo o tema de sua tese a difusão térmica de plasmas ionizados parcial e completamente. Ainda em 1951, Abrikosov passou a trabalhar com o físico russo Nikolay V. Zavaritskii sobre a verificação experimental da TL-G usando campos magnéticos críticos em filmes finos. Logo depois, em 1952 (*Doklady Akademii Nauk SSSR* 86, p. 489), Abrikosov propôs que existia um novo tipo de *supercondutor*, denominado por ele de *supercondutor do segundo grupo* (hoje, *supercondutor-II*), que não satisfazia a TL-G, pois nesta, o parâmetro κ tem a seguinte variação: $0 < \kappa < 1/\sqrt{2}$. Assim, para explicar esse grupo de *supercondutores* por intermédio da TL-G, Abrikosov propôs que $\kappa > 1/\sqrt{2}$. Com essa proposta, Abrikosov conseguiu explicar os resultados experimentais encontrados por Zavaritskii, em 1952 (*Doklady Akademii Nauk SSSR* 86, p. 581), sobre as propriedades *supercondutoras* de filmes finos de tálio (Tl) e estanho (Sn), em baixas temperaturas.

No ano seguinte, em 1953, Abrikosov fez uma outra descoberta ao perceber que a transição do estado *supercondutor* para o estado normal acontece gradualmente com o aumento do campo magnético, tendo este dois valores críticos (vide verbete nesta série). Entre esses dois valores, o campo gradualmente penetra no *supercondutor* formando finas fibras de fluxo magnético quantizado, fibras essas envolvidas por correntes de vórtice, conhecido como *vortex lattice* (hoje, *vortex Abrikosov lattice*). É interessante destacar que, como Landau não acreditou nesse estado de *vortex*, esse trabalho de Abrikosov só foi publicado em 1957 [*Journal of*

Experimental and Theoretical Physics (Soviet Physics-JETP) 5, p. 1174], depois que o físico norte-americano Richard Philips Feynman (1918-1988; PNF, 1965) publicou, em 1954 (*Physical Review* 94, p. 262), seu trabalho no qual considerou o hélio II (He II) como um *líquido quântico* e, portanto, ele poderia formar vórtices de corrente e quantizados. [Per Fridtjof Dahal, *Superconductivity (American Institute of Physics, 1992)*].

Em 1958 [*Journal of Experimental and Theoretical Physics (Soviet Physics-JETP)* 8, p. 182] e 1959 [*Journal of Experimental and Theoretical Physics (Soviet Physics-JETP)* 10, p. 132], Abrikosov e os físicos russos Lev Petrovich Gor'kov (n.1929) e Isaac Markovich Khalatnikov (n.1919) usaram a TL-G na linguagem das funções de Green, e estudaram a *supercondutividade* em alta frequência, ocasião em que anunciaram uma possível *supercondutividade sem intervalo (gapless superconductivity)*, que foi confirmada, em 1960 [*Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* 39, p. 1781; *Journal of Experimental and Theoretical Physics (Soviet Physics-JETP)* 12, p. 1243 (1961)], por Abrikosov e Gor'kov, ao estudarem o papel das impurezas magnéticas. É interessante destacar que, em 1958 [*Journal of Experimental and Theoretical Physics (Soviet Physics-JETP)* 7, p. 41], 1959 [*Journal of Experimental and Theoretical Physics (Soviet Physics-JETP)* 9, p. 1364] e 1960 [*Journal of Experimental and Theoretical Physics (Soviet Physics-JETP)* 10, p. 998], Gor'kov foi o primeiro a usar os *diagramas de Feynman* (funções de Green) para entender a *supercondutividade* e, com isso, mostrou que a TL-G é o caso limite da TBCS quando $T \rightarrow T_C$.

Na década de 1960, Abrikosov continuou a trabalhar com a *supercondutividade*. Com efeito, em 1962 [*Journal of Experimental and Theoretical Physics (Soviet Physics-JETP)* 15, p. 752], Abrikosov e Gor'kov introduziram o espalhamento spin-órbita para explicar o misterioso *deslocamento Knight (Knight shift)*, que é o deslocamento na frequência de ressonância magnética nuclear de uma substância paramagnética, em baixas temperaturas, que foi observado pela primeira vez, em 1949 (*Physical Review* 76, p. 1259), pelo físico norte-americano Walter David Knight (1919-2000). Mais tarde, em 1964 [*Journal of Experimental and Theoretical Physics (Soviet Physics-JETP)* 19, p. 988], Abrikosov voltou a trabalhar com o *vortex lattice*, conceito que havia introduzido, em 1953, ao estudar o campo crítico de filmes finos *supercondutores*. Em 1963, Abrikosov, Gor'kov e o físico russo Igor Ekhiel'evich. Dzyaloshinski (n.1931) publicaram o livro *Methods of Quantum Field Theory in Statistical Physics* (Prentice Hall). Em 1965, Abrikosov foi indicado Chefe do recente criado *Departamento de Física de Matéria Condensada*, no então *Instituto de Física Teórica* (hoje, *Instituto Lev Davidovich Landau*), e seu interesse de pesquisa passou a ser metais e semicondutores, sendo um de seus colaboradores o físico russo I. A. Ryzhkin, com o qual publicou, em 1977 (*Solid State Communications* 24, p. 317), sobre a teoria da condutividade de um metal quase-unidimensional.

Com a descoberta das *cerâmicas supercondutoras* ($T_C = 30$ K), em 1986, pelos físicos, o alemão Johannes Georg Bednorz (n.1950; PNF, 1987) e o suíço Karl Alex Müller (n.1927; PNF, 1987) (vide verbete nesta série), Abrikosov voltou a se interessar pela *supercondutividade de alta temperatura (high- T_C)* e publicou dois trabalhos: em 1999 (*Physica C* 317-318, p. 154), estudou a conexão da ressonância de tunelamento entre as camadas do *cuprato* (compostos químicos envolvendo o óxido de cobre: CuO_2), explicando com isso o mecanismo exótico da high- T_C dos *cupratos*, que ora se apresentavam como “bons”, ora como “ruins”; em 2000 (*Physica C* 341-348, p. 97), usou a TBCS para explicar as *singularidades tipo ponto de sela*

estendidas (extended saddle point singularities ou flat regions) no espectro do elétron. Para mais detalhes do trabalho de Abrikosov, ver sua *Nobel Lecture* (08 de Dezembro de 2003): Type II Superconductors and the Vortex Lattice.

Agora, vejamos o trabalho de Ginzburg em *supercondutividade* e em *superfluidez*. Em verbetes desta série vimos que, em 1938, o físico russo Pyotr Leonidovich Kapitza (1894-1984; PNF, 1978) descobriu que o hélio (He) que ele havia liquefeito (com uma nova técnica que inventara, em 1934), se tornava um líquido sem viscosidade (He II) na temperatura de 2,19 K, fenômeno esse denominado por ele de *superfluidez*. É interessante destacar que, também em 1938, os físicos canadenses John Frank Allen (1908-2001) e Austin Donald Misener (1911-1996), fizeram a mesma descoberta. Em 1941 (*Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* 11, p. 1; 581; *Journal of Physics-USSR* 4; 5, p. 181; 59), Kapitza observou que havia turbulência (*vortex*) no fluxo do He II. Ainda em 1941 (*Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* 11, p. 592; *Journal of Physics-USSR* 5, p. 71) e, depois, em 1944 (*Journal of Physics-USSR* 8, p. 1), Landau apresentou suas primeiras ideias sobre a *superfluidez* ocasião em que considerou o He II como um *líquido quântico*. Usando essas ideias de Landau, também em 1944 (*Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* 14, p. 134; 177), Ginzburg aplicou-as para explicar os efeitos termoeletrônicos no estado *supercondutor*. Logo depois, em 1945 (*Journal of Physics-USSR* 9, p. 305) e 1946 (*Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* 16, p. 87), Ginzburg voltou-se para contornar duas grandes dificuldades apresentadas pela teoria dos irmãos London, de 1935, vista acima: 1) ela não se aplicava a campos magnéticos fortes (da ordem do campo magnético crítico: H_C); 2) a energia de superfície na interface entre os estados normal e *supercondutor* é negativa e, para torná-la positiva, era necessário introduzir, sem explicação (*ad hoc*), uma alta energia de superfície de origem não eletromagnética. Também em 1945 (*Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* 15, p. 739) e 1946 (*Journal of Physics-USSR* 10, p. 107), Ginzburg desenvolveu a teoria dos efeitos ferroeletrônicos [iniciando com o titanato de bário ($BaTiO_3$)], usando a teoria de fases (estados) de Landau. Conforme vimos acima, as dificuldades apontadas acima foram resolvidas, em 1950, pela hoje TG-L. Pequenos ajustes dessa teoria com a experiência foram considerados por Ginzburg, em 1955 (*Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* 29, p. 748) e em 1956 (*Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* 31, p. 541). Depois da TBCS, de 1957, Ginzburg realizou outros trabalhos [*Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* 34, p. 113 (1958); 36; p. 1930 (1959); *Soviet Physics, Solid State* 2, p. 1824 (1961); *Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* 42, p. 299 (1962)] sobre materiais *supercondutores*, principalmente, os ferromagnéticos, nos quais estudou a quantização do fluxo magnético.

É interessante destacar que, antes da descoberta das *cerâmicas supercondutoras*, em 1986, como registramos acima, Ginzburg e o físico russo David Abramovic Kirzhnits (1926-1998), em 1977, editaram o livro intitulado *Problema Vysokotemperaturnoi Sverkhprovodimosti* ("O Problema da Supercondutividade em Alta-Temperatura"), no qual reuniram trabalhos sobre a possibilidade teórica de ser observado esse tipo de *supercondutividade* que, no entanto, apresentava uma temperatura limite: $T_C \leq 300$ K. É ainda oportuno destacar que, em 2009 (en.wikipedia.org/wiki/High-temperature_superconductivity), foi obtida a mais alta temperatura ($T_C = 135$ K) em um *supercondutor* de óxido de cobre, cálcio, bário e mercúrio ($HgBa_2Ca_2Cu_3O_x$) na pressão normal (ambiente).

O trabalho de Ginzburg em *superfluidez* começou, em 1943 (*Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* 13, p. 243), quando ele estudou o espalhamento da luz no He II. Logo em 1944 (*Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* 14, p. 134), Ginzburg estudou o comportamento do He II próximo do *ponto- λ* , temperatura (T_λ) na qual o hélio líquido possui duas fases líquidas: He I e He II, conforme as denominou o físico holandês William Hendrik Keesom (1876-1956), em 1932. Ao estudar, em 1933, o calor específico nessa transição de fase e como ela apresentou a forma da letra grega λ , o físico austríaco Paul Ehrenfest (1880-1933) deu-lhe o nome de *ponto- λ* . Em 1938, segundo anotamos anteriormente, Kapitza descobriu a *superfluidez* do He II. Voltemos a Ginzburg. Quando, em 1950, ele e Landau desenvolveram a *teoria- ψ da supercondutividade* (T- ψ SC) e, considerando que a *supercondutividade* é a *superfluidez* de um líquido carregado ou, equivalentemente, a *superfluidez* é a *supercondutividade* de um líquido não-carregado, Ginzburg percebeu (*Nobel Lecture*) que era natural usar a T- ψ SC para estudar a *superfluidez*. Assim, em 1958, Ginzburg e o físico russo Lev P. Pitaevskii (n.1933) (*Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* 34, p. 1240) e Pitaevskii (*Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* 35, p. 408) publicaram os primeiros trabalhos de aplicação da T- ψ SC no entendimento da *superfluidez* que, no entanto, só era válida em torno do T_λ . Em vista disso, Ginzburg e o físico russo Aleksandr A. Sobyenin (1943-1997), em 1976 (*Uspekhi Fizika Nauk* 120, p. 153) e 1988 (*Uspekhi Fizika Nauk* 154, p. 545), generalizaram essa aplicação que é hoje conhecida como *teoria- ψ da superfluidez* (T- ψ SF). Em 1997 (*Uspekhi Fizika Nauk* 167, p. 429) e 1998 (*Uspekhi Fizika Nauk* 168, p. 363), Ginzburg realizou novas pesquisas com a T- ψ SF. Maiores detalhes dos trabalhos de Ginzburg que o levaram ao Nobelato, ver: *Nobel Lecture* (08 de Dezembro de 2003): On Superconductivity and Superfluidity.

Para concluir esse verbete, analisaremos os trabalhos nobelísticos de Leggett. Em 1938, os físicos norte-americanos Hans Albrecht Bethe (1906-2005; PNF, 1967) (de origem alemã) e Charles Louis Critchfield (1910-1994) apresentaram o famoso *ciclo próton-próton* como gerador de energia das estrelas (da ordem da massa do Sol), obedecendo a uma reação termonuclear que envolvia o isótopo hélio-3 (${}^3_2\text{He}$), isótopo esse que só foi anunciado em 1939, ano em que começou, em 01 de setembro, a *Segunda Guerra Mundial*. Em virtude dessa Guerra, as pesquisas sobre esse raro isótopo do He só se intensificaram depois de seu término (1945) como subproduto do programa de produção de bombas nucleares (vide verbete nesta série). Assim, em 1949 (*Physical Review* 75, p. 1103), E. R. Grilly, E. F. Hammel e S. G. Sydorik produziram o ${}^3_2\text{He}$ em uma reação nuclear na qual o nêutron (${}_0n^1$) colide com o deutério (${}_1D^2$) e produz o trítio (${}_1T^3$); este, por sua vez [por intermédio do decaimento beta (ver verbete nesta série)], produz então o isótopo raro do He. Na linguagem atual, essa reação é representada por: ${}_0n^1 + {}_1H^2 ({}_1D^2) \rightarrow {}_1H^3 ({}_1T^3) \rightarrow {}_2He^3 + e^- + \bar{\nu}_e$. Como esse tipo de reação envolve água pesada (D_2O), o isótopo de hélio então formado estaria na forma líquida. Portanto, em 1950 (*Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* 20, p. 919), o físico russo Isaak Yakovlevich Pomeranchuk (1913-1966) sugeriu que temperaturas baixas poderiam ser obtidas solidificando o hélio-3 por compressão adiabática do estado líquido desse isótopo, obtido da maneira indicada acima. Assim, segundo Pomeranchuk, em baixas temperaturas, o *hélio líquido-3*, por apresentar spin fracionário em seu núcleo composto de dois prótons e de um nêutron (lembrar que essas partículas têm spin $\frac{1}{2}$ e, portanto, são

férmions), se tornaria um *líquido fermiônico* degenerado, com sua entropia (S) dependendo linearmente da temperatura [S(T)]. Esse processo de resfriamento ficou então conhecido como *efeito Pomeranchuk* ou *refrigeração Pomeranchuk*. Logo em 1951 (*Proceedings of the International Conference on Low-Temperature Physics*, Oxford University Press) Heinz London propôs a ideia de que temperaturas estáveis, na região de milikelvins (mK), poderiam ser conseguidas usando-se um novo tipo de refrigerador – o *refrigerador de diluição* –, baseado nas propriedades das misturas de hélio-3 e *hélio-4*.

Mais tarde, em 1956 (*Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* 30, p. 1058), Landau formulou sua famosa teoria do *líquido quântico de Fermi* para poder explicar possíveis propriedades bizarras do hélio líquido-3. Por exemplo, dentre essas propriedades, Landau previu que próximo do zero absoluto (0 K), haveria a propagação de uma única onda chamada por ele de *som zero*. É interessante registrar que, em sua também famosa teoria do *hélio líquido-4*, de 1940, Landau tratou-o como um *líquido quântico bosônico* (lembrar que o ${}^4\text{He}$ é formado de dois prótons e de dois nêutrons, que têm spin $\frac{1}{2}$, como vimos acima, e, portanto, o *hélio líquido-4* apresenta spin inteiro, logo é um bóson) e que apresentava vibrações (*fônons*: excitações acústicas elementares de um cristal) que, perto de 0 K, se propagavam com velocidades próximas à do som, isto é, 226 m/s (note que a velocidade do som no ar é ~ 330 m/s), daí Landau chamá-las de *segundo som*.

Vejamos agora o envolvimento de Leggett com o hélio-3. Depois de obter um bacharelado em artes, no *Baliol College* da *Universidade de Oxford* (UO), na Inglaterra, o lançamento do satélite russo *Sputnik*, no dia 04 de outubro de 1957, foi o mote para Leggett se interessar pela Física, ajudado pelos incentivos dos físicos ingleses David Brink e Michael Baker professores, respectivamente, do *Baliol College* e do *Merton College*, da UO. Desse modo, em 1964, ele obteve seu Doutorado em Física na UO, tendo como orientador o físico holandês Dirk ter Haar (1919-2002) e a Tese intitulada *Some Problems in the Theory of Many-Body Systems* (“Alguns Problemas da Teoria de Sistemas de Muitos-Corpos”). Obtido o PhD, Leggett foi para a *Universidade de Illinois* (UI), em Urbana-Champaign, nos Estados Unidos, para trabalhar no grupo do físico norte-americano David Pines (n.1924) [do qual participavam Bardeen e o físico norte-americano Leo P. Kadanoff (n.1937)], trabalhando entre agosto de 1964 e agosto de 1965. Foi na UI que Leggett teve contato com o hélio líquido-3 (HL-3), principalmente com os importantes artigos sobre a hipótese de que, semelhantemente aos *pares de Cooper* da TBCS, o HL-3 era constituído de pares de “quase-partículas” que, no entanto, apresentavam momentos angulares orbitais diferentes de zero ($\ell \neq 0$), ao contrário da TBCS que considerava os *pares de Cooper* com $\ell = 0$. Esses artigos foram publicados, em 1961 (*Physical Review* 123, p. 1911), por P. W. Anderson e pelo físico norte-americano Pierre Morel; em 1963, independentemente, por R. Balian e N. R. Werthamer (*Physical Review* 131, p. 1553) e por Yu. A. Vdovin, no livro editado por A.I. Alekseyeva e intitulado: *Application of Methods of Quantum Field Theory to Problems of Many Particles* (Gosatomizdat, Moscow). Note que a *onda p* ($\ell = 1$) desses modelos foi mais tarde reconhecida como a *fase (estado) de Anderson-Brinkman-Morel* (ABM) e a *fase (estado) de Balian-Werthamer* (BW) do hélio superfluido-3, quando este foi descoberto, em 1972, como veremos adiante. Assim, em 1965 (*Physical Review Letters* 14, p. 536), Leggett estudou a suscetibilidade magnética do hélio superfluido-3B (veremos a razão do B, mais adiante), considerando-o como um *líquido de Landau-Fermi*, incluindo o *som zero*. Registre-se que, em 1966 (*Progress in*

Theoretical Physics 36, p. 901), Leggett publicou um artigo no qual estudou as excitações coletivas de um *supercondutor de duas-bandas*. Aliás, nesse mesmo ano de 1966 (*Physical Review Letters* 17, p. 74), W. R. Abel, A. C. Anderson e John C. Wheatley realizaram uma experiência na qual confirmaram o *som zero* previsto por Landau, em 1956, segundo registramos antes.

No outono de 1967, Leggett voltou para a Inglaterra e começou a trabalhar na *Universidade de Sussex*, ministrando aulas como um *Lecture* e continuou a pesquisar o hélio-3. Logo em 1968 (*Physical Review Letters* 20; 21, p. 586; 506), ele e o físico inglês Michael John Rice (1940-2002) estudaram os efeitos teóricos de campos moleculares no comportamento do resfriamento do hélio-3, considerado como um líquido fermiônico, efeitos esses conhecidos como o fenômeno da *difusão do spin*. Esse efeito foi confirmado por Leggett, em 1970 (*Journal of Physics C: Solid State Physics* 3, p. 448). Em 1972, Leggett pensou em deixar sua pesquisa em hélio-3 e se dedicar ao estudo dos fundamentos da Física; contudo, em certo dia de julho desse mesmo ano, encontrou-se em Sussex com o físico norte-americano Robert Coleman Richardson (n.1937; PNF, 1996) que lhe falou sobre os trabalhos que havia feito sobre o hélio-3, conversa essa, segundo afirmou o próprio Leggett (*Nobel Lecture*), o levou a voltar a trabalhar com esse isótopo do He e, conseqüentemente, ao Nobelato. Antes, vejamos os trabalhos de Richardson.

Em 1959 (*Physical Review* 115, p. 1359), os físicos norte-americanos David Morris Lee (n.1931; PNF, 1996) e Henry A. Fairbank mediram a densidade do hélio líquido-3 e, então, observaram que ela se tornava máxima em torno de 0,5 K, e que o seu coeficiente de expansão térmica (k) era negativo ($k < 0$). Note que essa experiência foi uma das primeiras realizadas no *Laboratório de Física de Baixa Temperatura* criado por Lee, na *Universidade de Cornell* (UC). Nesse Laboratório, Lee obteve importantes resultados trabalhando com He. Com efeito, em 1961 (*Physical Review* 121, p. 1258), Lee, Fairbank e E. J. Walker fizeram novas medidas de k . Em 1965 (*Physical Review Letters* 14, p. 1017), Lee e F. P. Lipschultz fizeram a primeira observação do *som transversal* no *hélio sólido-4*. Em consequência desse resultado, Lee começou a pensar na construção de uma *cavidade Pomeranchuk* (*Pomeranchuk cell*) para obter baixas temperaturas. Para conseguir esse objetivo, Lee construiu primeiro um *refrigerador de diluição*, segundo a ideia de Heinz London (1951) vista acima, diluindo o hélio líquido-3 em *hélio superfluido-4* e, com isso, conseguiu temperaturas da ordem de 15 mK, menor que a temperatura ~ 20 mK conseguida pelo físico russo Yuri D. Anufriyev, em 1965 (*Journal of Experimental and Theoretical Physics – JETP Letters* 1, p. 155). Em 1969 (*Physical Review Letters* 23, p. 836), Lee, Richardson e os físicos norte-americanos James R. Sites e Douglas D. Osheroff (n.1945; PNF, 1996) mediram a suscetibilidade magnética da fusão do hélio-3 e encontraram um dado valor, em torno de 2 mK, que corresponde à temperatura de transição de fase magnética nuclear desse isótopo do He. Também em 1969 (*Physical Review Letters* 22, p. 449), os físicos da *Universidade da Califórnia*, em San Diego, R. T. Johnson, R. Rosenbaum, O. G. Symko e Wheatley esfriaram, por compressão, o hélio líquido-3 até a temperatura abaixo de 2 mK. Esta temperatura foi também confirmada por esses mesmos físicos, agora com a participação do físico finlandês Olli V. Lounasmaa (1930-2002), em 1970 (*Journal of Low Temperature Physics* 2, p. 403). Nessas experiências, Wheatley melhorou o equipamento usado por Anufriyev.

Por volta de 1970, Lee, Richardson, Osheroff e Linton R. Corruccini, em Cornell, de posse de uma *cavidade Pomeranchuk* começaram a testar a previsão teórica feita por Leggett e Rice, em 1968, e confirmada por Leggett, em 1970, sobre a

difusão do spin no resfriamento hélio líquido fermiônico-3, segundo registramos acima. A confirmação experimental dessa previsão teórica de Leggett, que era tema da Tese de Doutorado de Corruccini, foi publicada, com os nomes desses quatro físicos, em 1971 (*Physical Review Letters* 27, p. 650) e 1972 (*Journal of Low Temperature Physics* 8, p. 119).

Depois de participar dessas experiências, Osheroff começou a desenvolver a sua própria *cavidade Pomeranchuk* como tema de sua Tese de Doutorado e, com ela, checar um novo resultado obtido, em 1971 (*Journal of Low Temperature Physics* 6, p. 445), por Wheatley, Johnson e R. E. Rapp, resultado esse relacionado com uma depressão observada na curva de pressão de fusão do hélio-3 (mistura de *hélio sólido-3* e *hélio líquido-3*), o que significava uma magnetização irregularmente larga desse sólido em baixos campos magnéticos. Quando Osheroff, em 24 e 29 de novembro de 1971, estava medindo aquela curva de pressão (P), em função do tempo (t), usando um transdutor de pressão capacitiva que havia sido inventado por G. C. Straty e E. D. Adams, em 1969 (*Review of Scientific Instruments* 40, p. 1393), Osheroff percebeu que, na temperatura que havia estimado para realizar aquela medida, isto é, ~ 2,6 mK, havia naquela curva (P × t) dois pontos, as fases A e B, nos quais aparecia uma mudança em sua deflexão, sendo que, no ponto B, havia uma brusca queda de pressão. Esse resultado, aparentemente acidental, foi discutido por Osheroff, com Lee e Richardson, e juntos resolveram escrever um artigo, publicado em 1972 (*Physical Review Letters* 28, p. 885). Esse resultado foi confirmado, ainda em 1972 (*Physical Review Letters* 29, p. 920), em uma experiência realizada por esses três físicos, com a colaboração de Willie J. Gully, na qual fizeram uma *ressonância magnética nuclear (nuclear magnetic resonance – NMR)* em uma mistura de *hélio sólido-3* e *hélio líquido-3* na temperatura de ~2.6 mK, cujo resultado mostrou que alterações na curva (P × t) ocorriam no componente líquido daquela mistura e não na fase sólida como supostamente Osheroff, Lee e Richardson admitiram na primeira experiência. Desse modo, estava descoberta a superfluidade do hélio líquido-3 (SHeL-3). Ainda em 1972 (*Physical Review Letters* 29, p. 1227), Leggett apresentou uma primeira explicação teórica da SHL-3 usando o conceito que ele denominou de *quebra espontânea da simetria spin-órbita (spontaneously broken spin-orbity symmetry – SBSOS)*, conceito este questionado por P. W. Anderson, em 1973 (*Physical Review Letters* 30, p. 368). A descoberta da SHeL-3 foi confirmada, também em 1973, por Anufriyev, T. A. Alvesalo, H. K. Collan, N. T. Opheim e P. Wennerström (*Physics Letters A*43, p. 175) e por Alvesalo, Anufriyev, Collan, Lounasmaa e Wennerström (*Physical Review Letters* 30, p. 962). É interessante destacar que a transição entre a *fase normal* (N) (hélio líquido-3) e a fase A (hélio superfluido-3) é de *segunda-ordem*, e a de A para B, é de *primeira ordem*, segundo a classificação de Landau.

Ainda em 1973 novos resultados (experimentais e teóricos) foram apresentados para explicar e entender o SHeL-3. Por exemplo, Vinay Ambegaokar e N. David Mermin (*Physical Review Letters* 30, p. 81) mostraram, teoricamente, que a fase (estado) A do SHeL-3 poderia se desdobrar linearmente em um campo magnético; P. W. Anderson e W. F. Brinkman (*Physical Review Letters* 30, p. 1108) explicaram o comportamento (não-linear) da frequência da NMR entre as temperaturas $T_A \sim 2.6$ mK e $T_B \sim 2.0$ mK por intermédio da realimentação da flutuação de spin (*spin fluctuation feedback - SFF*), conhecida como a *fase (estado) Anderson-Brinkman-Morel (ABM)*, já registrada antes; o físico francês Pierre-Gilles de Gennes (1932-2007; PNF, 1991) (*Physics Letters A*44, p. 271) fez uma analogia entre a ABM e os cristais líquidos (vide verbete nesta série); Gully, Richardson, Lee, D. T.

Lawson e S. Goldstein (*Physical Review Letters* 30, p. 451) estudaram o comportamento do SHeL-3 usando ultrassom; P. Wölfle. (*Physical Review Letters* 30; 31, p. 1169; 1437) apresentou um estudo teórico dos modos comprimidos (*squashing modes*) coletivos (imaginário e real) da fase (estado) B do SHeL-3B , modos esses que são excitados por ultrassom e correspondem a dois tipos diferentes de distorções periódicas do intervalo de energia (*energy gap*); Johnson, Wheatley e D. N. Paulson (*Physical Review Letters* 31, p. 746) discutiram a queda de magnetização estática da fase (estado) B do SHeL-3B medida com um magnetômetro SQUID (*superconducting quantum interference*: vide verbete nesta série), ocasião em que observaram que aquela queda era muito maior que o esperado para a fase (estado) BW. Também em 1973 (*Journal of Physics C: Solid State Physics* 6, 2187; *Physical Review Letters* 31, p. 352), Leggett deu continuidade ao seu estudo teórico do SHeL-3 por intermédio do SBSOS (inclusive corrigindo alguns erros de sua proposta inicial), estudo esse prosseguido em 1974 [*Annals of Physics (NY)* 85, p. 11].

O ano de 1974 foi profícuo em informações sobre o hélio-3. Com efeito, sinais de *ressonância magnética longitudinal* nas fases A e B do hélio superfluido-3 (HeS-3) foram registrados, em trabalhos independentes, de Osheroff e Brinkman (*Physical Review Letters* 32, p. 584); de R. A. Webb, R. L. Kleinberg e Wheatley (*Physical Review Letters* 33, p. 145); e de Gully, Richardson, Lee, H. M. Bozler e M. E. R. Bernier (*Physical Review Letters* 32, p. 875). Por sua vez, William P. Halperin, C. N. Archie, F. B. Rasmussen, R. A. Buhrman e Richardson (*Physical Review Letters* 32, p. 927) observaram uma queda na entropia do spin do *hélio sólido-3* na temperatura em torno de 1mK, assim como Paulson, Wheatley e H. Kojima (*Physical Review Letters* 32, p. 1098) investigaram a transição de fase (estado) A – B do hélio superfluido-3 em um campo magnético em pressões abaixo da pressão de fusão e, com isso, estudaram a magnetização uniforme do líquido usando um magnetômetro SQUID. Por outro lado, Osheroff e P. W. Anderson (*Physical Review Letters* 33, p. 686), identificaram as fases (estados) A e B do HeS-3 , respectivamente, com as fases (estados) ABM (HeS-3A) e BW (HeS-3B). A analogia entre a ABM e os cristais líquidos voltou a ser investigada no trabalho de Ambegaokar, de Gennes e D. Rainer (*Physical Review A*9, p. 2676). A SFF foi novamente usada por Brinkman, P. W. Anderson e J. Serene (*Physical Review A*10, p. 2386) na análise da discrepância entre as fases (estados) A e B do HeS-3 .

Novas experiências e novos trabalhos teóricos sobre o HeS-3 continuaram na segunda metade da década de 1970. Em 1975 (*Reviews of Modern Physics* 47, p. 331), Leggett usou uma interação dipolar macroscópica para descrever a dinâmica de spin na superfluidez do hélio-3. Com isso, calculou a diferença de *frequência magnética transversal* da NMR entre as fases (estados) ABM e BW, bem como confirmou a *frequência magnética longitudinal* em ambas dessas fases. Ainda em 1975, a suscetibilidade magnética da fase (estado) B (χ_B) do HeS-3B foi objeto de estudo teórico e experimental nos seguintes trabalhos: A. I. Ahonen, Alvesalo, M. T. Haikala, Matti Krusius e M. A. Paalanen (*Physics Letters A*51, p. 279); Corruccini e Osheroff (*Physical Review Letters* 34, p. 695; *Physics Letters A*51, p. 447); Brinkman e Henri Smith (*Physics Letters A*53, p. 43); e Mermin (*Physical Review Letters* 34, p. 1651) analisou a fase (estado) A_1 do HeS-3 e mostrou que ela é, possivelmente, um emparelhamento de *onda f* ($\ell = 3$). Note que a fase (estado) A do HeS-3A separa-se nas fases (estados) A_1 e A_2 na presença de um campo magnético, por *efeito Zeeman* (vide verbete nesta série). Em 1976 houve a confirmação de alguns desses resultados previstos. Por exemplo, Mermin (*Physical Review B*13, p. 112) confirmou o

emparelhamento da *onda f*; C. M. Gould, Gully, Richardson e Lee (*Journal of Low Temperature Physics* 24, p. 563) confirmaram a equivalência entre as fases (estados) A e ABM do HeS-3; e Ahonen, Krusius e Paalanen (*Journal of Low Temperature Physics* 25, p. 421) re-obtiveram a medida da χ_B usando a técnica NMR. Em 1977 (*Annales de Physique* 106, p. 79), Leggett e o físico japonês S. Takagi trataram a dinâmica de spin do HeS-3 levando em consideração efeitos dissipativos. Ainda em 1977 (*Physical Review Letters* 39, p. 587), Leggett analisou a grandeza do momento de dipolo elétrico (\vec{d}) que produz uma interação fraca (ver verbete nesta série) no HeS-3. Para maiores detalhes dos trabalhos de Leggett sobre superfluidez-II, ver sua *Nobel Lecture: Superfluid 3-He – The Early Days as Seen by a Theorist* (08 de dezembro de 2003).

Depois de seu trabalho na *Universidade de Sussex*, de 1967 a 1983, Leggett voltou para a *Universidade de Illinois* (UI), em 1983, para realizar novas pesquisas, principalmente sobre sistemas macroscópicos dissipativos envolvendo muitos-corpos, pesquisa essa que havia iniciado, em 1980 (*Progress of Theoretical Physics Supplementa* 69, p. 80), quando estudou a superposição coerente de funções de onda naqueles sistemas. Em 1981 (*Physical Review Letters* 46, p. 211) e em 1983 (*Annals of Physics* 149, p. 374), Leggett e o físico brasileiro Amir Ordacgi Caldeira (n.1950) investigaram o tunelamento quântico de sistemas dissipativos. Ainda em 1983 (*Physica A121*, p. 587), Leggett e Caldeira usaram a *integral de caminho feynmaniana* para estudar o movimento browniano quântico. A influência do amortecimento na interferência quântica foi novamente estudada por Leggett e Caldeira, em 1985 (*Physical Review A31*, p. 1059). A solução exata encontrada por eles nesses seus trabalho, é hoje conhecida como *equação de Caldeira-Leggett*. É interessante destacar que Leggett também estudou a dissipação em sistemas de dois estados, em 1984 (*Physical Review Letters* 52, p. 5), com S. Chakravarty, e em 1987 (*Reviews of Modern Physics* 59, p. 1), com Chakravarty, A. T. Dorsey, Mathew P. A. Fisher, Anupam Garg e W. Zwerger.



[ANTERIOR](#)

[SEGUINTE](#)